

„A ritka nemesgáz izotópokon lejátszódó nukleáris asztrofizikai reakciók vizsgálata” c. OTKA (T 49245) szakmai zárójelentése (részletes).

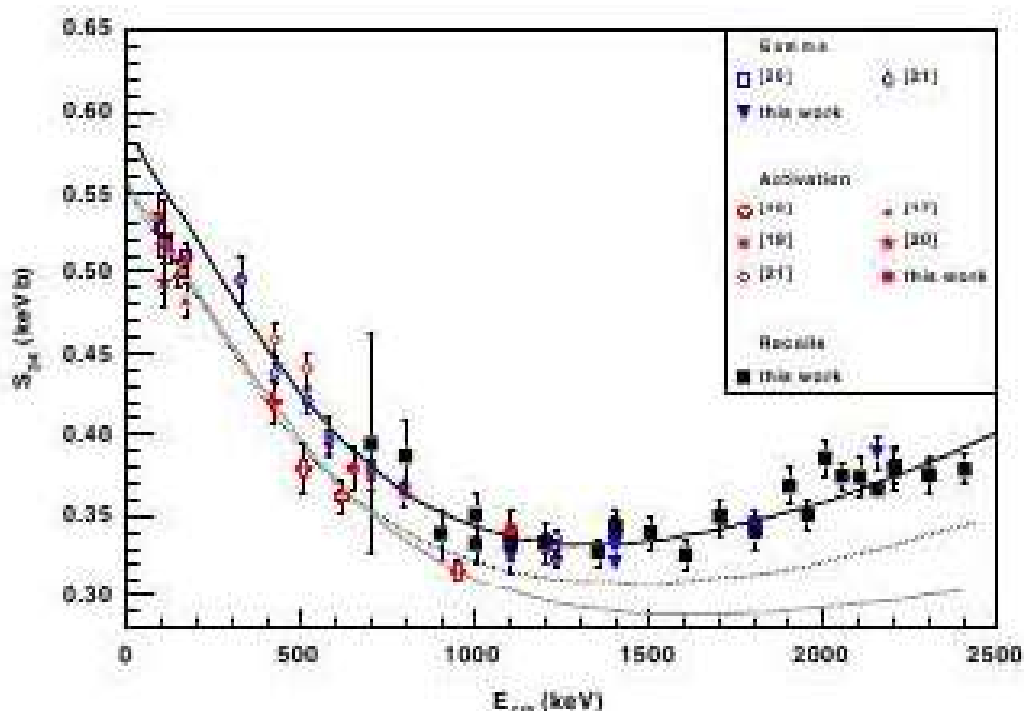
A Nap-neutrínó fluxus elméleti számításában a legnagyobb magfizikai bizonytalanságot a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció hatáskeresztmetszete képviseli, amit az ún. neutrínó probléma (neutrínó puzzle) egy lehetséges megoldásának hittek. Az utóbbi évek sikeres kísérletei (SNO, Kamland) azonban bizonyították a neutrínó oszcillációk létezését és magyarázatot adtak a neutrínó detektorokkal tapasztalt Nap-neutrínó hiányra. Ezzel egy új korszak vette kezdetét, nevezetesen a neutrínó-spektroszkópia, ahol a Nap-neutrínó fluxus a részecske fizika standard modelljének ellenőrzésére szolgálhat. Továbbá, a különböző neutrínó fluxusok pontos ismerete hozzásegíthet a Nap fizikai és kémiai tulajdonságainak megértéséhez. Ehhez azonban szükség van a megfelelő magreakciók hatáskeresztmetszetének megfelelő pontosságú ismeretére. Amennyiben a hatáskeresztmetszet, a neutrínó megfigyelések, valamint az oszcilláció paraméterek hibái jelentősen csökkenthetők, a CNO-ciklus és a pp-lánc neutrínói lehetővé tennék a Nap magjában az ősrobbanásból származó szén és nitrogén mennyiségének meghatározását. Ehhez a jelenleg mért ${}^7\text{Be}$ -neutrínók fluxusát meghatározó ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció $\sigma(E)$ hatáskeresztmetszetét legalább 3% pontossággal kell ismerni.

Ez a reakció ugyanakkor szintén meghatározó szerepet játszik a „Nagy Bumm” során keletkező atommagok (BBN) gyakoriságában. A csillagászati megfigyelések és a kozmológiai modellek eredményei jó egyezést mutatnak a D, ${}^3\text{He}$ és ${}^4\text{He}$ magok gyakoriságaira, de a ${}^7\text{Li}$ gyakoriságára a modellek jóval nagyobb értéket (2-3-szoros) jósolnak. Egy lehetséges megoldásnak a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció $\sigma(E)$ hatáskeresztmetszetének pontos ismerete kínálkozott. A BBN-ben a reakció végmagjából elektron-befogással keletkező ${}^7\text{Li}$ gyorsan megsemmisül a ${}^7\text{Li}(p,\alpha)\alpha$ reakció nagy hatáskeresztmetszete miatt. Ugyanakkor, a ${}^7\text{Be}$ bomlásának felezési ideje elegendően hosszú ahhoz, hogy megmaradjon addig, amíg a proton-sűrűség és energia elegendően alacsony lesz, a megsemmisítő reakció befagy. Tehát a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció hatáskeresztmetszetének pontos ismerete a ${}^7\text{Li}$ probléma egyik lehetséges megoldásaként is szolgálhat.

A fentiek miatt az elmúlt évek során számos erőfeszítés történt annak érdekében, hogy különböző mérési módszerekkel a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció hatáskeresztmetszetét [ill. a vele arányos $S(E)$ -t] pontosan meghatározzák a BBN-nek és a hidrogén-égésnek megfelelő energiákon. (Az S -faktor a hatáskeresztmetszettel arányos asztrofizikában szokásosan használt mennyiség). A mérések lefedték a BBN energiatartományát ($E_{\text{cm}} \approx 180 - 400$ keV), ugyanakkor a Napban a hidrogén-égés Gamow-energia tartományáig ($E_0 = 22$ keV) nem sikerült lemenni és extrapolációra volt szükség (E_{cm} a tömegközépponti energia). Az extrapolációhoz modellek használatára van szükség, ezért a pontosság érdekében törekedni kell a méréseket minél alacsonyabb energiákon elvégezni, csökkentve ily módon az extrapoláció okozta bizonytalanságot. Ennek határt szab az energiával csökkenő, egyre kisebb $\sigma(E)$ hatáskeresztmetszet. A különböző mérések eredményei a $\sigma(E)$ energiatartományát illetően elég jól egyeznek, de az abszolút értékekben jelentősen eltérnek.

Méréseinket 3 független módszerrel végeztük: prompt- γ , aktivációs és végmag-visszalökés („recoil separator”) módszerekkel. Mindhárom módszerben ablak nélküli gáz-céltárgyak használatára került sor. A prompt- γ és az aktivációs mérések az alacsony háttérű földalatti laboratórium (Gran Sasso, Olaszország) 400 keV-es, nagyáramú gyorsítójával történtek a Luna nemzetközi projekt keretében. A végmag aktivitásának meghatározása off-line méréssel történt. Hosszú és pontos

próbamérésekre volt szükség a lehetséges szennyező reakciók azonosításához és a meglökött végmagot befogadó megfelelő anyag (catcher) kiválasztásához annak érdekében, hogy minél kisebb hatáskeresztmetszeteket lehessen mérni. A prompt- γ mérésekhez nagy feloldású Ge(Li) detektorok szolgáltak. Az aktivációs módszerrel (nagy tisztaságú rézbe löködött ^7Be végmag aktivitásának mérése) sikerült az eddigi legalacsonyabb energiánál ($E_{\text{cm}} = 93 \text{ keV}$) megmérni a hatáskeresztmetszetet. Ez az energia már közel van a Nap Gamow-energia tartományához. A bochumi Ruhr Egyetem (Németország) ERNA (European Recoil separator for Nuclear Astrophysics) berendezése szolgált a 3. módszer, a meglökött ^7Be végmagok közvetlen detektálására. Ebben az esetben is először pontos próbamérésekre került sor annak bizonyítására, hogy a rendkívül kis számú meglökött ^7Be mag mindegyike energiától és töltésállapottól függően eléri a detektort ($\cong 100\%$ acceptance). A mérések energiatartománya $E_{\text{cm}} = 700 - 3200 \text{ keV}$ volt. A biztosabb azonosítás érdekében néhány energiánál a meglökött magokkal koincidenzában a reakcióból kilépő γ -sugárzás mérésére is sor került. A szeparátortól független, de az ERNA gáz céltárggyal végzett aktivációs kísérletre is sor került. A céltárgy mögött, de a szeparátor előtt egy réz catcher-el összegyűjtött ^7Be magok aktivitás mérése a besugárzást követően a fent említett földalatti laboratóriumban történt. A 3 módszerrel kapott eredményeinket néhány, a közelmúltban kapott eredménnyel együtt az **1. ábra** foglalja össze. (Az ábrában a referencia számok a Phys. Rev. Letters **102**, 232502 (2009) közlemény számozásának felelnek meg. A „this work” jelölés az ERNA, a [20,17,18] referenciák a fent leírt méréseinkre utalnak.)



1. ábra. A $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reakció $S(E)$ értékére vonatkozó újabb mérési adatok (ld. még szöveges rész). A görbék az adatokhoz illesztett egyes modell-számolások eredményei.

A prompt- γ , az aktivációs és a végmag-visszalökés méréseink eredményei jól egyeznek egymással, az S -faktor értékek átlagértékére kapott $S(0) = 0,57 \pm 0,04$

kev.b jobb, mint a korábban elfogadott érték, hibája lényegesen kisebb, de még mindig nem éri el a Nap-modellek igényelte pontosságot. A kisebb hiba érték ugyanakkor nagyon fontos, mert jelentősen csökkenti a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakcióból származó ${}^8\text{B}$ (${}^7\text{Be}+p$) és ${}^7\text{Be}$ neutrínó-fluxusok bizonytalanságát. Ennek, valamint a ${}^8\text{B}$ neutrínó-fluxus pontos mérésének köszönhetően a Borexino és SNO kísérletekkel meg lehet határozni a Nap magjában a C és N gyakoriságokat. A Nap belső és felszíni összetételének összehasonlításával pedig a standard Nap-modell alapvető feltevései válnak ellenőrizhetővé.

Az a feltételezés viszont, hogy a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció pontosabb ismerete megoldhatja a BBN ${}^7\text{Li}$ problémáját, nem állja meg a helyét. A kapott új $S(0)$ értékkel végzett BBN standard modell számolásokból a ${}^7\text{Li}$ gyakoriságára kapott ${}^7\text{Li}/\text{H} = (5,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-10}$ érték több mint 3-szorosa a megfigyeltnek.

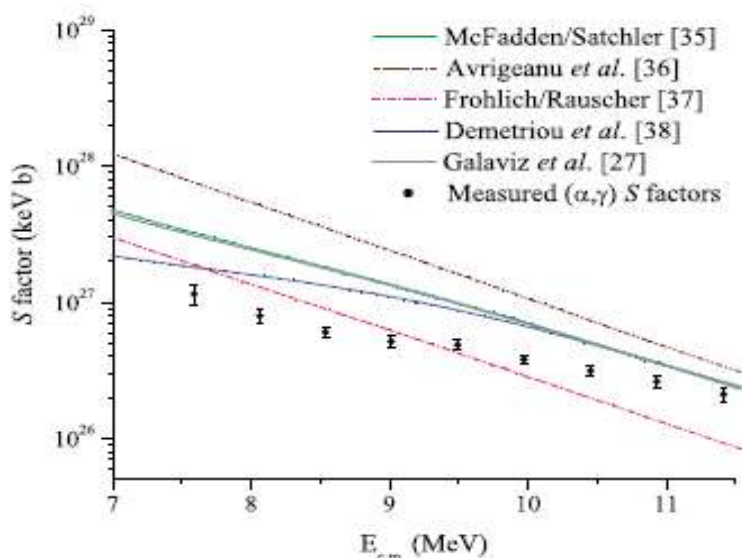
A hidrogén-égés ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakciója mellett más, a folyamat szempontjából fontos reakciókat is vizsgáltunk melyek főleg az égés CNO ciklusában játszanak főszerepet. Ezen kísérletekre is a Luna projekt keretében a Gran Sasso-i földalatti gyorsító mellett került sor. A ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$ befogási reakció a CNO ciklus leglassúbb folyamata, más szóval meghatározza a teljes ciklus sebességét. Asztrofizikai jelentősége ezen kívül az, hogy a reakció sebességének pontos ismerete erősen befolyásolja az Univerzum legöregebb képződményei, a gömbhalmazok korának meghatározását. Nem utolsósorban, a reakció neutrínókat szolgáltat a Nap neutrínó spektrumához. A reakció hatáskeresztmetszetének meghatározása két mérésben történt, az egyik szilárd, a másik ablak nélküli gáz-céltárgyak használatával. Szilárd céltárgyon végzett mérésekhez a jó feloldású Ge(Li) detektor szolgált, biztosítva az egyes γ -átmenetek pontos azonosítását. A mérés során az elért legalacsonyabb energia $E_p = 140$ keV volt. Gáz céltárgyon végzett mérésekhez BGO-gyűrűdetektor szolgált. Energia feloldása a Ge-detektor feloldásánál rosszabb ugyan, de lényegesen nagyobb hatásfoka tette lehetővé, hogy a reakció hatáskeresztmetszetét az eddigi legalacsonyabb energiánál sikerült megmérni. A vizsgált energia tartomány $E_p = 80 - 250$ keV volt, amely jócskán belenyúlik a reakció Gamow-ablakába (30–110 keV 20–130 MK hőmérsékletnél), így az extrapoláció (R-mátrix illesztés) tartománya minimálisra csökkent. Ennek eléréséhez alacsony energiáknál hosszú mérésekre volt szükség, ennek jellemzésére álljon itt egy adat, nevezetesen, 80 keV-nél ($E_{\text{cm}} = 70$ keV) a reakcióból származó γ -beütések száma a detektorban 11/nap volt [$\sigma(E) = 0.24$ picobarn!], a közel 4π detektor-térszög ellenére. A kapott $S(0)$ és hibája lényegesen alacsonyabb a korábbi mérések értékeinél. Az új S-faktort használva a CNO ciklusban a reakciósebességek 40%-al alacsonyabbak (és lényegesen pontosabbak), mint a korábban elfogadott értékek. Az új reakciósebességeket alkalmazva megállapították, hogy a gömbhalmazok (\approx Univerzum) mintegy 1 milliárd évvel idősebbek a korábban becsülnél. Ezen reakció pontossága is – a Nap-neutrínókhöz adott járuléka révén – hozzájárul csillagunk belső struktúrájának pontosabb ismeretéhez, hasonlóan a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakciónál leírtakhoz.

A másik vizsgált reakció, a ${}^{25}\text{Mg}(p,\gamma){}^{26}\text{Al}$, sebességének pontos meghatározása a világűrben nagy mennyiségben jelenlevő és a műholdakkal feltérképezett ${}^{26}\text{Al}$ értelmezése és magyarázata szempontjából lényeges. Az ${}^{26}\text{Al}$ mag főként a ${}^{25}\text{Mg}(p,\gamma){}^{26}\text{Al}$ befogási reakcióban keletkezik a hidrogén égés Mg-Al alciklusában. Ezen kívül a ${}^{25}\text{Mg}(p,\gamma){}^{26}\text{Al}$ reakció számos, különböző hőmérsékletű asztrofizikai helyszínen is lejátszódhat (nehéz csillagokban [WR-csillagok], könnyebbekben [AGB], nova robbanásokban, szupernóvákban), de legvalószínűbb helye a WR (Wolf-Rayet) csillag. Ennek tisztázásához is közelebb visz a hőmérséklet-függő

reakciósebesség pontosabb ismerete. A mérést az teszi nehezzé, hogy ez a képződési sebesség elsősorban a jelenlevő alacsony energiájú rezonanciáktól, ezek járulékától függ, melyek erőssége nagyon kicsi. Méréseink a Luna projekt keretében befejeződtek, a kiértékelés folyamatban van. Előzetes eredményeink egyeznek a korábbi mérések eredményeivel, de nagyobb pontosságúak. Ez azt jelenti, hogy az elért kisebb bizonytalanság csak enyhén változtathatja meg a reakció-sebesség értékét.

A p -folyamat. A stabil magok neutron-befogási folyamataival (s - és r -folyamat) a $Z > 26$ elemek néhány stabil, protonban gazdag izotópja (p -magok) nem jöhet létre, mert a befogást követő β -bomlásokkal szemben stabil magok árnyékában helyezkednek el. Az elfogadott képződési mechanizmus szerint az ezeket szintetizáló u.n. p -folyamat zömében a pre-szupernovában (ennek O-Ne rétegében), (γ, n) és ezt követő (γ, α) vagy (γ, p) reakciókon keresztül zajlik. Az egymás utáni foto-neutron reakciókkal egyre növekvő S_n kötési energia miatt a folyamat lelassul, egyensúlyba kerül a mindig jelen levő (n, γ) reakcióval és ezen a helyen ("várakozási hely") α és/vagy proton emisszió léphet fel a folyamat folytatásaként. A várakozási helyek maguk a p -magok (alsó A-tartomány), vagy ezek β -bomló elődei (magasabb A-k). Más, egyes p -magokat kisebb valószínűséggel létrehozó folyamatok/helyszínek is léteznek, ezt itt most nem említjük. Az elmondottakból következik, hogy ami a kísérleti vizsgálatokat illeti, legfontosabbak a várakozási helyek ill. ezek környezetének tanulmányozása. Célja a p -folyamat modell csak elméleti számításokon alapuló magfizikai bemenő adatai helyességének ellenőrzése. A gamma indukált reakciók méréséhez változtatható energiájú, intenzív gamma-sugár forrásra van szükség, ami csak az elmúlt néhány évben és csak egy-két helyen áll rendelkezésre. Jelenleg a direkt (γ, α) és (γ, p) reakciók mérése a magas sugárzási háttér miatt sem megoldott. Ráadásul súlyos problémaként jelentkezik, hogy itt a céltárgy alapállapotban van, míg szupernova környezetben a magok egy része gerjesztett állapotban van. Az első, p -folyamatra vonatkozó méréseket Debrecenben végeztük (és jelenleg is folytatjuk), amit számos más kísérleti munka követett a világ különböző laboratóriumaiban. Ezekben nem gamma indukált reakciók, hanem az inverz (α, γ) és (p, γ) reakciók hatáskeresztmetszetének mérése történik, amiből a "részletes egyensúly" elve alapján a direkt reakciók sebessége meghatározható. A kísérleti nehézségeket az alacsony hatáskeresztmetszetek jelentik, aminek oka a nehéz magok magas Coulomb gátja, valamint a 10 MeV körüli bombázó energiáknál jelentkező magas háttér. Kísérleteink során számos, a p -folyamat számára fontos magreakciót vizsgáltunk. A kísérletek fő motivációja a kevés rendelkezésre álló kísérleti adat. A p -izotópok relatív gyakoriságát ezért elméleti számítások szolgáltatják, amihez óriási reakció hálózatot (mintegy 2000 izotóp, 23000 reakció) vesznek figyelembe. A hálózat reakcióinak hatáskeresztmetszeteit Hauser-Feshbach (HF) statisztikus modell számítások szolgáltatják. Az elméleti hatáskeresztmetszet értékeket mért értékeinkkel hasonlítjuk össze, ezzel egyrészt ellenőrizzük a statisztikus modell alkalmazhatóságát a p -folyamatokra, másfelől a modellben használt egyes α -mag ill. p -mag optikai potenciálokkal kapott eredményeket hasonlítjuk össze kísérleti adatainkkal a legjobb potenciál kiválasztásához. Méréseink zömében a debreceni ciklotronnal történtek aktivációs módszerrel. A tipikusan használt bombázó energiák a céltárgy tömegszámától függően protonokra 2 - 8 MeV, α -részecskékre 7 - 15 MeV volt. A szilárd céltárgyak vákuum párologtatással készültek. Számos esetben dúsított izotópokat kellett használni egyrészt az alacsony hatáskeresztmetszet, másrészt a p céltárgy-mag 1 % körüli

relatív gyakorisága miatt. Méréseink új eredményeit külön-külön minden reakcióra nem részletezzük, tekintettel arra, hogy mindegyik mért hatáskeresztmetszet [$S(E)$ érték] új érték, a reakciók első mérését végeztük. A vizsgálatokban általában külföldi kutatók is részt vettek. Az Otká támogatással vizsgált reakciókat az **I. Táblázat** tartalmazza. A már megmért, de analízis vagy publikáció előkészítés fázisában lévő reakciókat * jelöli. A $^{112}\text{Sn}(\alpha,\gamma)^{116}\text{Te}$ és a $^{112}\text{Sn}(\alpha,p)^{115}\text{Sb}$ reakciók mérése a Notre Dame Egyetemen (Indiana, USA) történt. A $^{106}\text{Cd}(\alpha,\gamma)^{110}\text{Sn}$, $^{106}\text{Cd}(\alpha,p)^{109}\text{In}$ és a $^{106}\text{Cd}(\alpha,n)^{109}\text{Sn}$ reakciók mérésére Debrecenben és Notre Dame-ben is sor került. A kapott $\sigma(E)$ értékek kiváló egyezést mutatnak. A kísérleti és a különböző α -mag potenciálokkal számított (HF NON SMOKER kód) $S(E)$ értékek jelentősen eltérnek, kivéve az (α,n) reakciót, ahol jó az egyezés. Az (α,γ) esetében a számított értékek jelentősen túlbecsülik, míg az (α,p) esetében alábecsülik $\sigma(E)$ értékét. Ez az anomália minden α -indukált reakció esetében hasonló, vagyis az α -mag potenciálok egyike sem alkalmas a reakció csatornák egyidejű leírására. Ezt mutatja a $^{112}\text{Sn}(\alpha,\gamma)^{116}\text{Te}$ reakció példáján a **2. ábra**. (Hivatkozások számozását ld. a Phys.Rev. **C75**,25801(2007) publikációnkban). Proton-indukált reakciók esetében viszont azt tapasztaltuk, hogy általában mind a (p,γ) , mind a (p,n) reakció csatornákra a p-mag



2. ábra. A $^{112}\text{Sn}(\alpha,\gamma)^{116}\text{Te}$ reakció $S(E)$ mért értékeinek összehasonlítása a különböző potenciálokkal végzett számításokkal (HF NON SMOKER kód).

globális optikai potenciálokkal számolt eredmények a kísérlet értékeket elfogadhatóan jól írják le. A következtetések általánosnak tekinthetők, mivel a vizsgált reakciók száma (ld. táblázat+a táblázatban nem szereplő korábbi méréseink) már szisztematikus vizsgálatot jelent. Külön kell említeni a $^{85}\text{Rb}(p,n)^{85}\text{Sr}$ reakció hatáskeresztmetszet méréseit. Szokásosan használt az a feltevés, hogy asztrofizikai mérésekre a pozitív Q értékkel bíró reakciók alkalmasak azért, hogy a laboratóriumi és csillagbéli reakciósebességek Coulomb elnyomás okozta különbsége a minimálisra csökkenjen. A $^{85}\text{Rb}(p,n)^{85}\text{Sr}$ reakció vizsgálata során bebizonyítottuk, hogy negatív Q -értékű reakciók is jó reakció sebesség értékeket szolgáltatnak. Tekintettel arra, hogy az α -mag optikai potenciálokkal nem sikerült reprodukálni az (α,γ) reakciók mérési eredményeit, rendkívül pontos és részletes rugalmas α -szórás

méréseket végeztünk, azért, hogy a Rutherford-szórástól való eltérés analízisével kísérleti potenciál-paramétereket határozzunk meg. Ezen a szórási méréseinket az **I. táblázat** utolsó oszlopában tüntettük fel. A kapott paraméterek használata sem oldotta meg az α -mag potenciállal kapcsolatos problémát.

I. Táblázat. Az asztrofizikai p-folyamat vizsgálataink során mért α - és p-indukált magreakciók reakciók.

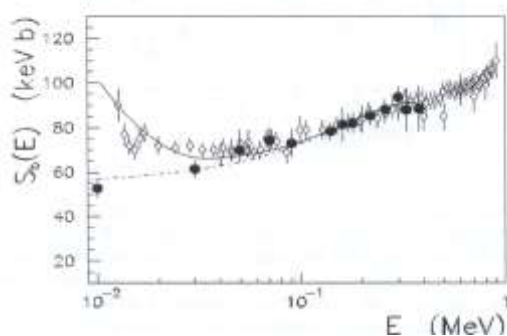
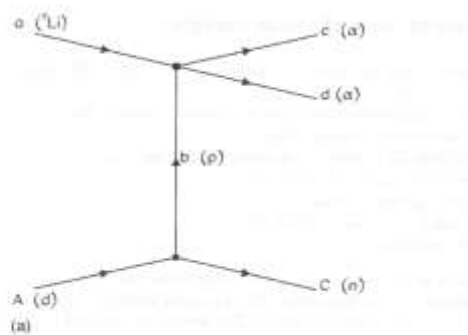
| proton-indukált reakciók | alfa-indukált reakciók | alfa rugalmas szórás |
|--|---|---|
| $^{106}\text{Cd}(p,\gamma)^{107}\text{In}$ | $^{113}\text{In}(\alpha,\gamma)^{117}\text{Sb}$ | $^{89}\text{Y}(\alpha,\alpha)^{89}\text{Y}$ |
| $^{108}\text{Cd}(p,\gamma)^{109}\text{In}$ | $^{113}\text{In}(\alpha,n)^{116}\text{Sb}$ | $^{92}\text{Mo}(\alpha,\alpha)^{92}\text{Mo}$ |
| $^{70}\text{Ge}(p,\gamma)^{71}\text{As}$ | $^{169}\text{Tm}(\alpha,\gamma)^{173}\text{Lu}^*$ | $^{106}\text{Cd}(\alpha,\alpha)^{106}\text{Cd}$ |
| $^{76}\text{Ge}(p,n)^{76}\text{As}$ | $^{169}\text{Tm}(\alpha,n)^{172}\text{Lu}^*$ | $^{110}\text{Cd}(\alpha,\alpha)^{110}\text{Cd}^*$ |
| $^{85}\text{Rb}(p,n)^{85}\text{Sr}$ | $^{151}\text{Eu}(\alpha,\gamma)^{155}\text{Tb}^*$ | $^{116}\text{Cd}(\alpha,\alpha)^{116}\text{Cd}^*$ |
| $^{120}\text{Te}(p,\gamma)^{121}\text{I}$ | $^{151}\text{Eu}(\alpha,n)^{154}\text{Tb}^*$ | $^{112}\text{Sn}(\alpha,\alpha)^{112}\text{Sn}$ |
| | $^{112}\text{Sn}(\alpha,\gamma)^{116}\text{Te}$ | *folyamatban |
| | $^{112}\text{Sn}(\alpha,p)^{115}\text{Sb}$ | |
| | $^{106}\text{Cd}(\alpha,\gamma)^{110}\text{Sn}$ | |
| | $^{106}\text{Cd}(\alpha,n)^{109}\text{Sn}$ | |
| | $^{106}\text{Cd}(\alpha,p)^{109}\text{In}$ | |

Terveinkben szerepelt a $^{124}\text{Xe}(\alpha,\gamma)^{128}\text{Ba}$ vizsgálata gáz-céltárgy használatával. A ^{124}Xe (0,1%) p-mag rendkívül drága, ablak nélküli gáz céltárgy nem jöhet szóba, ezért kisméretű zárt cellát fejlesztettünk ki. Ebben az egyes energiáknál történt besugárzás után a gáz könnyen cserélhető és visszanyerhető, hasonlóan a ^{128}Ba végmagokat összegyűjtő „catcher” fólia is. Ez utóbbi aktivitás mérése off-line történik. A mérőberendezés elkészült, tesztelése folyamatban van, a valódi mérések hamarosan elkezdődnek. A következő nemesgáz izotópon tervezett (α,γ) mérés céltárgya a ^{78}Kr (0,35%) p-mag lesz.

A $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ és a p-folyamatban vizsgált reakciók hatáskeresztmetszet mérése aktivációs módszerrel történt, ezért a felezési időt esetleg befolyásoló tényezőket is kísérleti úton ellenőriztük. Egy a fémekre alkalmazott (módosított) Debye-modell jóslata szerint a fémekbe implantált aktív magok felezési idejét megváltoztatja az elektronárnyékolási hatás, amit a fémek szabad elektronjai okoznak. A változás mértéke a jóslat szerint függ a befogadó anyagtól és a hőmérséklettől. Ez utóbbira $T^{1/3}$ hőmérsékletfüggést prognosztizál. Méréseink szerint a 4 vizsgált befogadó anyagba (Pd, W, Zr és Ta) implantált e^- -befogással bomló ^7Be mag felezési ideje hibahatáron belül nem változott, ami az anyagfüggést cáfolja. Alacsony hőmérsékleten ($T=12^\circ\text{K}$) a Pd-ba és In-ba implantált ^7Be felezési ideje kevesebb, mint 1%-al csökkent. A modell érvényessége szempontjából perdöntő mérést végeztünk Ta-ba és Ge-ba implantált ^{74}As maggal. Ez a mag β^- -al és β^+ -al is bomlik, így a modell szerint az elektronárnyékolás hatására az egyik bomlás felezési ideje

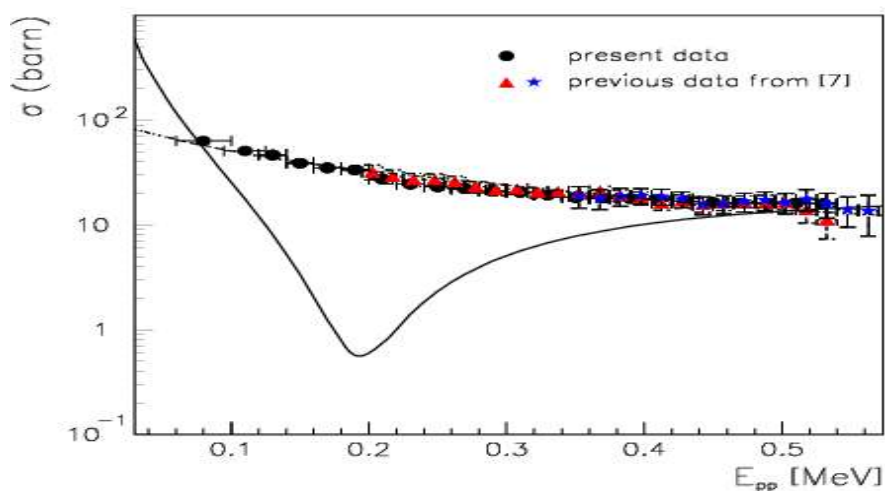
nő, másiké csökken, tehát a változásnak még markánsabban kell jelentkezni. A Ta (fém) és a Ge (félvezető) közegtől függést itt sem találtunk. Speciális berendezéssel a mintákat 250 mK (!) és szobahőmérséklet között több ponton mérve, a felezési idő nem változott, hőmérséklet-függést. Mivel sem közeg-, sem hőmérséklet-függést nem találtunk, megállapítottuk, hogy az említett módosított Debye-modell az elektronárnyékolási hatás leírására nem alkalmas. A felezési idő vizsgálatokhoz tartozik még a ^{154}Tb pontos felezési idejének meghatározása. P-folyamat vizsgálataink során mértük a $^{150}\text{Eu}(\alpha, \gamma)^{154}\text{Tb}$ befogási reakciót aktivációs módszerrel. A hatáskeresztmetszet hibáját a ^{154}Tb végmag izomér állapotának pontatlanul ismert felezési ideje jelentősen növeli. Ezért pontosabban megmértük a felezési időt, az új érték $T_{1/2} = 9,994 \pm 0,039$ óra, szemben az irodalomban eddig használt $T_{1/2} = 9,4 \pm 0,4$ óra értékkel.

A nemzetközi együttműködések segítségével elnyert kiegészítő Otkának (IN64269) köszönhetően méréseket végeztünk a „Trójai Ló” módszerrel (Trojan Horse Method: THM) olasz (Catania) kutatókkal együtt. Az indirekt módszer lényege, hogy 3 test reakciókat használ a kívánt 2 test reakciók hatáskeresztmetszet meghatározásához. A módszer előnye, hogy mivel a 2 test reakció a mag belsejében (Coulomb-gát „mögött”) megy végbe, közel nulla bombázó energiánál - a reakció Gamow-ablakában - határozható meg a hatáskeresztmetszet, vagyis elektronárnyékolási hatás (Coulomb) és extrapoláció nélkül. Vegyük az $a + A \rightarrow C + c + d$ 3-test reakciót, ahol az $A = (b + C)$ szerkezetű, összetett atommag („trójai ló”). A kívánt 2-test reakció pedig $a + b = c + d$. A Coulomb gátnál magasabb energiájú a bombázó részecske akadálytalanul áthalad a gáton és kölcsönhat a felhasadó A mag b összetevőjével, C fragmentje pedig tovább repül és elviszi a felesleges kinetikus energiát. A módszer szigorúan csak akkor alkalmazható, ha a felhasadás kváziszabad kinematikája biztosított. Ez kísérleti megszorításokkal, nevezetesen a megfelelő bombázó energia és detektálási szögek megválasztásával biztosítható, aminek teljesülését kísérletileg természetesen ellenőrizni kell. A THM módszerrel a $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$ reakció hatáskeresztmetszetét mértük extrém alacsony energiákon. Ehhez a $\text{D}(^7\text{Li}, \alpha)^4\text{He}$ és a $^3\text{He}(^7\text{Li}, \alpha\text{d})^4\text{He}$ 3 test reakciókat alkalmaztuk, ahol a D ill. a ^3He magok hasadnak fel. Ez a mérés szolgált a módszer alkalmazhatósági tesztjeként. A THM eredményeknek a $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$ reakció direkt mérési adataival történő összehasonlítása a módszer egyértelmű alkalmazhatóságát bizonyította. A folyamat gráfját és az összehasonlítást a **3. ábra** mutatja. Jól látható, hogy a THM



3. ábra. A THM módszer gráfja (balra) és a THM eredmények (vastag pontok) összehasonlítása a $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$ reakció (elektronárnyékolással bíró) direkt mérésével (jobbra).

módszerrel kapott asztrofizikai S-faktor valóban mentes a direkt mérésben jelentkező elektronárnyékolástól. Egy másik kísérletben a rugalmas proton-szórás vizsgáltuk THM módszerrel. A p-p szórási adatokat a $p+d \rightarrow p+p+n$ reakció méréséből vontuk ki. A magerőkre vonatkozó számolások p-p szórási adatait kísérletileg közvetlenül igazolni korábban nem lehetett a Coulomb - mag kölcsönhatás interferenciájának (destruktív) megjelenése miatt. A THM módszerben a Coulomb-gát hatása, tehát a zavaró interferencia nem jelentkezik, a kapott p-p szórási értékek kiválóan egyeznek az elméleti görbével. Ezt mutatja a **4. ábra**, ahol méréseinket a tele pontok és a háromszögek jelzik, a csillagozott adatok egy előzetes THM mérés eredményei.



4. ábra. A p-p szórás hatáskeresztmetszete az interferenciával (kihúzott vonal), az elméleti értékek (pont-vonal) és a THM mérési adatok (korábbiak: Δ és $*$).

A klasszikus novákban lejátszódó magszintézis egyik fontos folyamatát, a $^{17,18}\text{O}(p,\alpha)^{14,15}\text{N}$ magreakció hatáskeresztmetszetét is meghatároztuk a THM módszerrel a korábban nem elérhető extrém alacsony (0-200 keV) energiáknál. A mérést $^{17,18}\text{O}$ nyalábbal bombázott D céltárgyon végeztük.